

Préparation à l'agrégation de Sciences-Physiques ENS Physique

Optique : expériences de base

Sextant, *Optique expérimentale*

I) Sources lumineuses

1) Sources thermiques

Elles ont un spectre continu dont l'intensité dépend de la longueur d'onde. Elles constituent une bonne première approximation de la *lumière blanche* (spectre plat dans le visible).

a) Lampes à incandescence ordinaires

Le filament de tungstène est porté à une température d'environ 2800 K. Il est placé sous vide, ou dans une atmosphère gazeuse inerte, pour éviter l'oxydation. La répartition spectrale est à peu près celle d'un corps noir porté à la même température (avec donc une part importante du rayonnement dans l'infrarouge).

b) Lampes à incandescence Quartz-Halogène (en particulier Quartz-Iode)

Le principe est le même que pour les lampes précédentes, mais l'ajout d'un gaz halogène à l'intérieur de l'ampoule augmente son temps de vie, en limitant la vaporisation du tungstène. Cela permet donc de porter le filament à une température plus élevée (3200 K), ce qui augmente l'intensité lumineuse et décale le maximum d'émission du spectre vers le visible.

2) Lampes spectrales

Ce sont des lampes à vapeurs atomiques, qui fournissent des spectres de raies. Ces lampes nécessitent un autotransformateur spécial. En effet, une haute tension est nécessaire pour établir une décharge entre les électrodes, les électrons accélérés excitant les atomes par collision (ceux-ci émettent alors de la lumière en se désexcitant).

Vous utiliserez fréquemment des lampes à vapeur de sodium (le doublet jaune du sodium fournit également la lumière des réverbères) ou des lampes à vapeur de mercure (qui émettent plusieurs raies). Ces dernières peuvent être :

- soit basse pression (raies fines, $\Delta\lambda \approx 10^{-2}$ nm, effet Doppler dominant, émission par unité de surface faible) ;
- soit haute pression (raies élargies, $\Delta\lambda \approx 10^{-1}$ nm, effet collisionnel important mais Doppler toujours dominant, émission par unité de surface élevée) : les lampes dites *Philora*, en particulier, montées dans un carter spécial qui contient leur transformateur. Ne pas les confondre avec les lampes Quartz-Iode (Q.I.) qui sont placées dans des carters similaires.

Ces sources n'atteignent leur régime de fonctionnement permanent qu'après plusieurs minutes : il faut donc les **brancher en avance** et éviter de les éteindre, car elles ont besoin de refroidir avant d'être rallumées.

3) Lasers

On utilisera essentiellement deux types de sources lasers avec des puissances de l'ordre du mW durant l'année :

- les lasers hélium-néon, ayant pour avantage d'être très monochromatique (longueur d'onde de 632,8 nm pour le rouge, 543 nm pour le vert), peu divergent (avec une ouverture de l'ordre de 10^{-3} rad) mais très encombrant (à cause de la cavité Fabry-Pérot).

- les diodes lasers, beaucoup plus portables, mais avec une divergence de faisceau un peu plus grande et une longueur d'onde à calibrer.

Malgré leur faible puissance, **les faisceaux sont dangereux pour la rétine**. On prendra donc garde de ne pas l'orienter vers le jury, et on fera attention aux réflexions intempestives sur les éléments des montages ainsi que sur les bagues, bracelets ou montres lorsque votre main coupe le faisceau laser.

II) Projection sur un écran éloigné

Il s'agit de former l'image agrandie d'objets éclairés par une lampe à halogène (Q.I.) sur un écran à plusieurs mètres pour les rendre visibles d'une salle entière.

1) Condenseur

Définition : c'est une lentille convergente placée entre la lampe et l'objet.

Vous disposez de condenseurs qui s'adaptent directement sur les carters des lampes Q.I. ou Philora. Ils servent à collecter le maximum de rayons issus de la lampe et à les renvoyer sur l'objet. Ils sont en réalité composés de deux lentilles plan-convexe. Leur distance focale va de 8 à 15 cm. Sachant que la distance lampe-lentille vaut 15 cm quand le condenseur est fermé :

- un condenseur de 15 cm fermé donne un faisceau **quasi parallèle**,
- un condenseur de 8 cm fermé donne un faisceau convergent à une vingtaine de centimètres du condenseur.

Il est possible dans chaque cas d'augmenter un peu la convergence en éloignant le condenseur de la lampe à l'aide de la poignée.

Vérifier rapidement ces propriétés avec les condenseurs à votre disposition. Leur utilisation pratique est illustrée dans les paragraphes suivants.

2) Projection d'un petit trou

À l'aide d'un condenseur très convergent, faire converger la lumière sur un trou. Déplacer ensuite légèrement le trou, observer les irisations, et les interpréter en termes d'aberrations chromatiques du condenseur, en considérant que l'indice du verre décroît quand la longueur d'onde augmente.

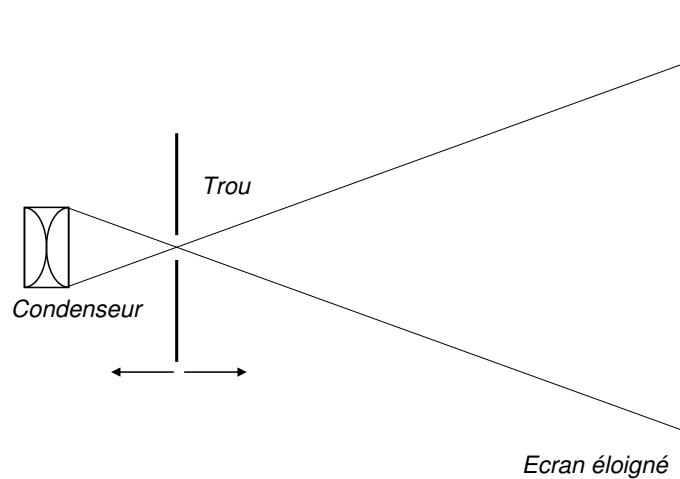
Pour la suite, placer le trou au point de convergence moyen pour éviter les irisations.

Faire l'image du trou sur l'écran avec une lentille de courte focale (≈ 10 cm).

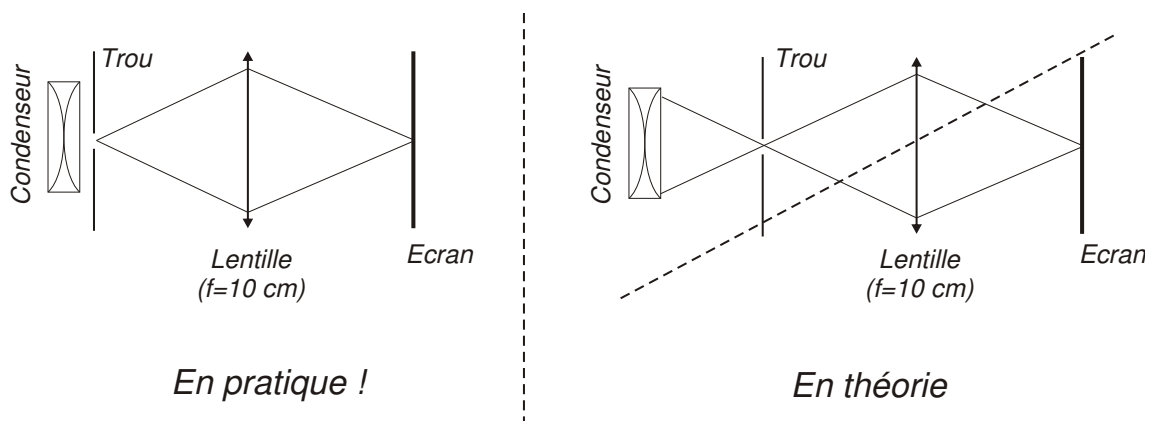
Retournez la lentille. Obtenez-vous une meilleure image ?

Explication : dans l'approximation de Gauss, une lentille a un fonctionnement symétrique mais ici, elle est complètement couverte par le faisceau, donc ce niveau d'approximation n'est plus valable. Pour trouver le bon sens d'utilisation, on utilisera la règle des 4P (**P**lus **P**lat, **P**lus **P**rès) qui consiste à placer la face plane de la lentille du côté de l'objet s'il est plus près de la lentille que l'image, et du côté de l'image dans le cas contraire (Cf. Sextant pour une explication rapide).

Attention : la règle des 4P n'est valable que pour un objet peu étendu autour de l'axe optique. Elle peut être mise en défaut pour des objets plus étendus.



Dans la pratique pour faire l'image nette d'un trou on se placera dans les mêmes conditions que pour réaliser l'image d'une fente (Cf. 3-b).



3) Projection d'un objet transparent (non diffusant)

a) Image d'un quadrillage

Il s'agit d'obtenir l'image d'un quadrillage transparent, en montrant la plus grande surface possible (champ maximum).

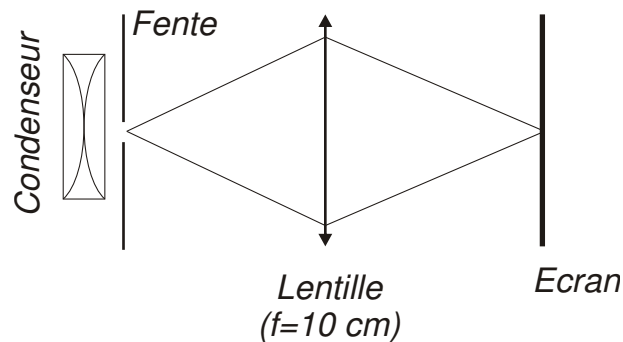
Commencer sans condenseur : ajuster l'ensemble lampe, quadrillage, lentille (f de l'ordre de 10 cm) pour avoir une image. Pourquoi est-elle si médiocre ?

Ajouter le condenseur (8 cm) et remarquer que pour que le champ soit maximum, *il faut placer l'objet contre le condenseur*. Par ailleurs, pour que l'image soit la meilleure possible, *on a intérêt à placer la lentille au point de convergence des rayons*.

Remplacer le condenseur de 8 cm par un condenseur de 12 cm. Observer l'effet de diaphragme maintenant causé par la lentille.

Note : les lentilles de courtes focales (10 ou 15 cm) permettent d'obtenir des grossissements importants mais donnent plus d'aberrations que les autres. Une focale de 20 cm est un bon compromis aberrations-grossissement.

b) Image d'une fente



Pour avoir la luminosité maximum, il faudrait placer la fente le plus près possible du point de convergence en s'assurant qu'elle diaphragme bien le faisceau.

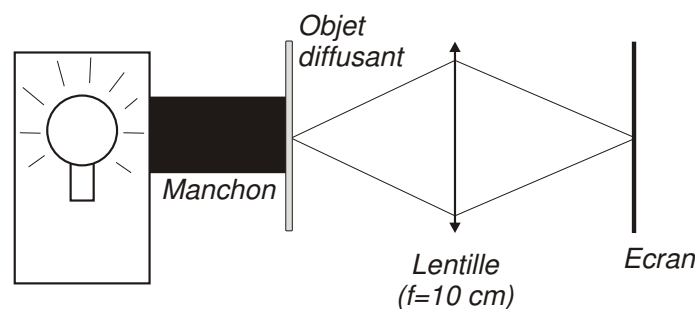
Cependant dans la pratique, il est souvent meilleur de la placer contre le condenseur. Cela présente deux avantages majeurs : on s'affranchit ainsi de l'image du filament qui se situe justement au point de convergences des rayons issus du condenseur et on réduit la lumière parasite. Soigner la netteté.

4) Projection d'un objet diffusant

Un objet est parfaitement diffusant si, quelle que soit la provenance de la lumière qui l'éclaire, il la renvoie de manière isotrope (exemples : papier blanc, écran, papier calque, *etc*).

Projeter par exemple l'image d'un calque quadrillé et vérifier que l'usage d'un condenseur n'est pas nécessaire. Pourquoi ?

On peut ajouter un manchon noir pour réduire la lumière parasite.



III) Expériences simples d'optique géométrique

1) Obtention d'un faisceau de lumière parallèle par autocollimation

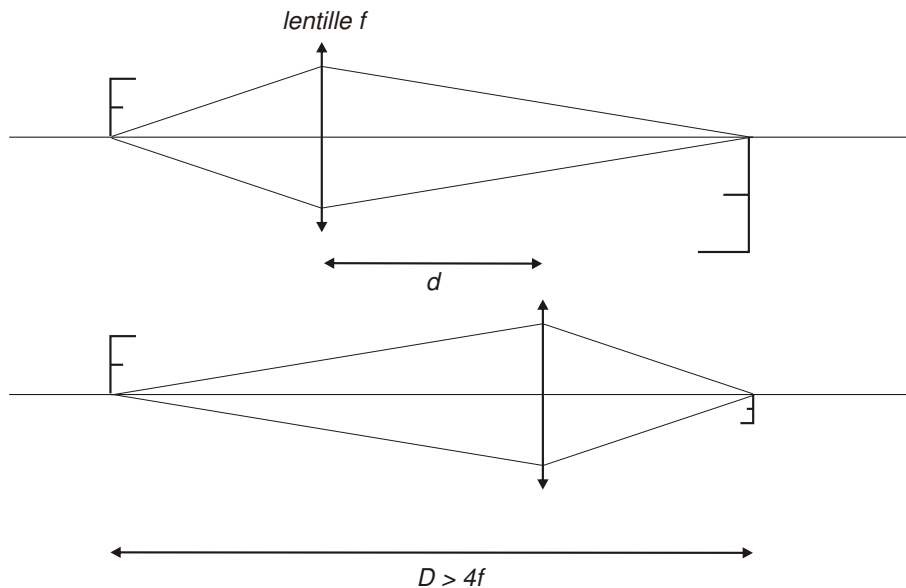
Procéder comme pour former l'image d'un trou (*cf*.II.2). Ajouter un miroir plan à la sortie de la lentille et ajuster la position de celle-ci pour que l'image du trou après réflexion sur le miroir soit nette dans le même plan que le trou. Enlever le miroir. En déplaçant un écran après la lentille, vérifier que si le trou est petit, le faisceau est bien parallèle.

2) Mesure de la distance focale d'une lentille mince convergente

a) Par autocollimation

Dans l'expérience précédente, que vaut alors la distance trou-lentille ? Conclusion ?

b) Par la méthode de Bessel



Pour une distance D donnée entre un objet et son image par une lentille de focale f , il existe deux positions de la lentille pour lesquelles objet et écran sont conjugués, à condition que $D > 4f$. On prendra donc garde de ne pas essayer de faire une image sur un écran situé à 1 mètre avec une lentille de focale trop grande : l'impression sur le jury est déplorable ! Lorsque $D > 4f$, et en notant d l'écart entre les deux positions de la lentille pour lesquelles objet et image sont conjugués, on peut montrer (le faire) que $f = (D^2 - d^2)/4D$. Cette méthode est plus précise que la méthode de Silbermann (voir ci-dessous) car elle s'affranchit de la mesure du grandissement. On peut encore améliorer la précision en réalisant l'expérience pour plusieurs valeurs de D et en réalisant un ajustement.

c) Par la méthode de Silbermann

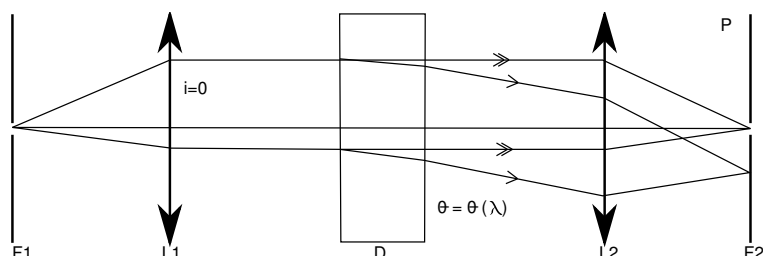
On se place dans le cas où la distance D entre l'objet et son image est minimale. Elle est alors égale à $4f$ et la lentille se trouve à mi-chemin de l'objet et de l'image. De plus, le grandissement est alors égal à -1 .

Prendre pour objet une plaque percée d'une ouverture en forme de F. Fixer du côté source de cette plaque du papier calque. Former l'image du F sur l'écran. Rechercher la position de Silbermann et en déduire la distance focale de la lentille. Si l'image est de trop mauvaise qualité, placer contre la lentille un diaphragme. Le choisir cependant le moins petit possible pour que la profondeur de champ reste faible (voir le TP "Instruments d'optique"), ce qui permet une bonne acuité de mise au point.

IV) Spectroscopes à prisme ou à réseau

1) Principe

Le principe général d'un spectromètre à prisme ou à réseau est le suivant :



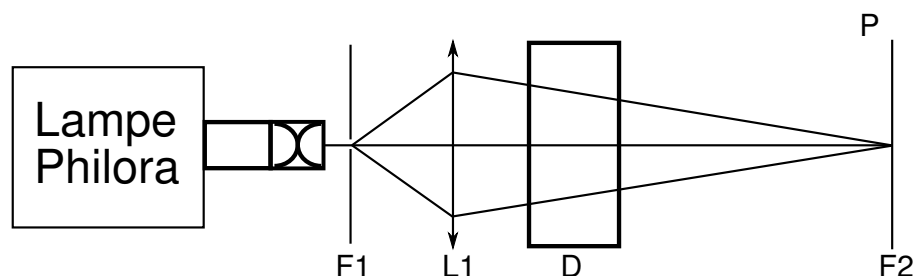
Le système est composé d'une fente d'entrée F_1 , située au foyer objet d'une lentille L_1 donnant un faisceau de lumière parallèle. L'élément dispersif D est placé dans ce faisceau. À la sortie de D , on a pour chaque longueur d'onde λ un faisceau parallèle d'incidence $\theta(\lambda)$. La lentille de sortie L_2 refocalise ces différents faisceaux dans un plan P . Pour chaque λ , on a donc dans ce plan **une image de la fente F_1** . Pour analyser la lumière émise par la source, on déplace dans le plan P une fente de sortie F_2 derrière laquelle est placé le détecteur.

On appelle pouvoir de résolution le rapport $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$, $\delta\lambda$ étant le plus petit intervalle spectral résolu. Il existe plusieurs causes de limitation du pouvoir de résolution de l'instrument :

- le pouvoir de résolution intrinsèque de l'élément dispersif est limité par la diffraction. Il est donc d'autant plus grand que la partie éclairée de l'élément dispersif est large.
- la largeur des fentes d'entrée et de sortie limite géométriquement le pouvoir de résolution de l'instrument.
- d'autres facteurs peuvent intervenir pour limiter le pouvoir de résolution, les aberrations des lentilles par exemple.

Remarque : (Réalisation approchée)

Sur le schéma de principe précédent, on éclaire le système dispersif en lumière parallèle car les prismes ou réseaux ne sont rigoureusement stigmatiques que dans ce cas. Dans les expériences usuelles avec projection sur un écran éloigné on se contente d'un stigmatisme approché en réalisant le montage ci-dessous qui présente l'avantage de n'utiliser qu'une seule lentille.



2) Étude des limitations du pouvoir de résolution avec le prisme à vision directe

Le prisme à vision directe (PVD) permet d'observer la dispersion par un prisme sans en avoir la déviation. Le choix du prisme à vision directe (au lieu du réseau) est fait pour des questions de luminosité et de visibilité de l'expérience. Cependant, le PVD a essentiellement un caractère pédagogique et qualitatif; on prendra garde d'utiliser un réseau pour toutes mesures quantitatives.

a) Projection du spectre du mercure

On utilise une lampe à vapeur de mercure pour observer un spectre de raies et étudier le pouvoir de dispersion du dispositif de manière simple. Le mercure présente en effet une raie verte à 546,1 nm et un doublet jaune à 576,9 et 579,0 nm sur lesquels on peut visualiser l'évolution du pouvoir de résolution en fonction de différents paramètres. On réalise l'image de la fente source sur l'écran. Une lentille de 15 à 20 cm de distance focale doit permettre d'obtenir sur un écran placé à 2 ou 3 mètres une image de bonne taille. Intercaler le prisme à vision directe et observer pour chaque longueur d'onde une image de la fente source décalée et de même largeur que l'image obtenue en l'absence d'élément dispersif. Ajuster éventuellement la mise au point. Remarquer aussi la présence de raies UV intenses dans le spectre du mercure à l'aide d'une feuille de papier blanc. Cet effet spectaculaire est dû aux agents azurants ajoutés au papier (ces molécules absorbent l'ultraviolet et réémettent dans le domaine du violet-bleu).

b) Influence de la largeur de la fente source

La fente source utilisée doit être réglable en largeur et utilisée d'abord *largement ouverte*. En diminuant la largeur de la fente source, on voit les raies devenir de plus en plus fines. Observer en particulier le comportement de la raie jaune et vérifier qu'elle se dédouble lorsque l'image géométrique de la fente source est de largeur inférieure à l'écart du doublet sur l'écran. À la limite de résolution, le pouvoir de résolution est égal à :

$$R = \frac{\lambda_{jaune}}{\Delta\lambda} \simeq \frac{600}{2} = 300$$

c) Influence de la largeur éclairée du dispositif

Dans cette expérience, on limite la surface éclairée du prisme en intercalant une fente réglable contre la face d'entrée du prisme.

Choisir la fente d'entrée F_1 suffisamment fine pour que le doublet jaune du mercure soit bien résolu. **Fermer progressivement la fente qui est contre le prisme (F_3 de largeur a)** et observer l'élargissement des raies du spectre par diffraction. La largeur d'une raie observée sur l'écran est de l'ordre de grandeur de celle du pic central de diffraction par la fente de largeur a , soit $2\lambda D/a$. Le vérifier sur une raie simple (la raie verte), en utilisant une fente étalonnée. Quand la demi-largeur due à la diffraction devient du même ordre de grandeur que l'écart du doublet, on ne peut plus le résoudre. À la limite de résolution, le pouvoir de résolution est encore égal à 300.

Remarque :

Dans les conditions courantes d'emploi des spectroscopes, on est souvent contraint d'utiliser, pour avoir une bonne luminosité, une largeur de fente source telle que c'est elle qui limite le pouvoir de résolution de l'instrument. Le pouvoir de résolution s'écrit alors :

$$R = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{d\theta}{d\lambda},$$

où $\frac{d\theta}{d\lambda}$ est la dispersion angulaire du dispositif dispersif et α la largeur angulaire de la fente d'entrée.

3) Étude du réseau

Interposer le réseau près de la lentille. Observer les différents ordres. Comparer les spectres obtenus avec les différents réseaux à votre disposition.

Mesurer la déviation $X(\lambda)$ et vérifier la loi donnant la déviation angulaire $\theta(\lambda)$.

On pourra utiliser une lampe qui possède des raies dans tout le domaine visible : zinc – cadmium – mercure (voir la notice pour l'identification des raies). Elle a cependant l'inconvénient d'être moins lumineuse qu'une lampe à vapeur de mercure.

On mettra successivement en évidence l'effet :

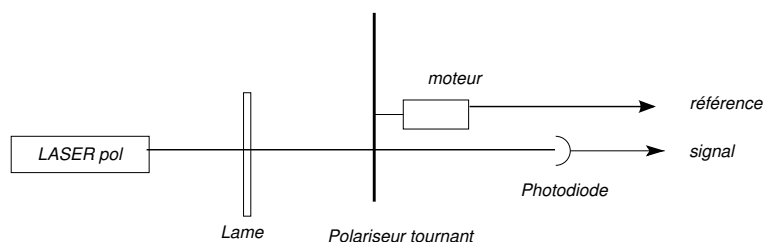
- du nombre n de traits par mm
- de l'ordre k

Observer si ces réseaux présentent un effet de "blaze".

V) Vérification de la loi de Malus

Ref : *Sextant* p. 301 et suivantes.

Un polariseur de type polaroïd a été monté sur le moteur d'un hacheur optique pour obtenir un polariseur en rotation. Une petite languette de scotch noir est collée sur le bord du disque dans la direction de l'axe absorbant du polariseur. Son passage dans la fourche optique permet au boîtier du hacheur de fournir une tension de référence (sortie « reference out ») dont le zéro correspond au passage de l'axe absorbant dans la direction (généralement) verticale. On obtient ainsi un signal de synchronisation.



Envoyer sur ce polariseur tournant le faisceau d'un laser polarisé. Observer l'évolution temporelle de l'intensité émergente avec une photodiode et un oscilloscope numérique. Faire une acquisition de ce signal et l'ajuster de façon à vérifier la loi de Malus. Commenter en particulier la période et la valeur moyenne. Pourquoi la loi de Malus illustre-t-elle le caractère vectoriel de la lumière ?